

Estimación de caudales de bombeo y abatimientos en el acuífero inferior del PH Angostura por métodos numéricos¹

Asdrúbal Vargas²

Por medio de un modelo numérico se simuló el descenso del nivel piezométrico del acuífero inferior que se encuentra bajo los vertederos del Proyecto Hidroeléctrico Angostura.

Palabras claves

Caudales, acuífero inferior, abatimientos.

Resumen

Por medio de un modelo numérico se simuló el descenso del nivel piezométrico del acuífero inferior que se encuentra bajo los vertederos del Proyecto Hidroeléctrico Angostura. Según el modelo se requieren seis pozos para abatir 17 m el nivel de agua subterránea del acuífero en un tiempo de 12 días alrededor del vertedero principal. La calibración y ajuste del modelo se realizó teniendo en cuenta el nivel piezométrico en el estado

estacionario y se modificó la conductividad hidráulica hasta lograr una diferencia menor a un metro entre los valores observados y simulados. El cálculo del caudal de bombeo requerido para cada pozo se obtuvo utilizando la opción de *zone budget* y celdas de carga constante.

Este tipo de modelos son útiles para determinar el caudal y el número de pozos necesarios en excavaciones de obras civiles con niveles de agua subterránea elevados y como insumo para elaborar presupuestos dentro de los planes de construcción de proyectos hidroeléctricos.

1 Este artículo presenta los resultados obtenidos de una investigación desarrollada en el Centro de Servicio Exploración Subterránea para buscar soluciones alternativas para la mitigación de las presiones de agua subterránea contenida en el acuífero inferior que se encuentra debajo de varias obras civiles del P.H. Angostura.

La importancia de este artículo radica en el manejo automatizado de datos hidrogeológicos para simular el funcionamiento de un acuífero, que representan fuentes de agua subterránea de gran importancia pero que, en condiciones de elevada presión hidrostática, representan un problema de tipo ingenieril.

2 Funcionario del Instituto Costarricense de Electricidad. Centro de Servicio Exploración Subterránea. Correo electrónico: (avargas@ice.go.cr).

Introducción

El objetivo de este trabajo es el de modelar el abatimiento del nivel de agua subterránea provocado por una batería de pozos en el acuífero inferior que se encuentra en el sector de la presa y los vertederos del Proyecto Hidroeléctrico Angostura. El Proyecto Hidroeléctrico Angostura está concebido para la generación de 177 MW de energía utilizando las aguas transportada principalmente por el río Reventazón, pero haciendo uso también de los ríos Turrialba y Tuis (Fig. 1).

En el área de estudio han sido llevadas a cabo investigaciones geológicas y geotécnicas por el ICE (1977); Granados y Morera (1980); Morera (1983); Saénz (1985), Avilés (1994); Piedra (1994); Piedra *et al.* (1994); Piedra *et al.* (1995), ICE (1996), Alvarado y Leandro (1997), Vargas (1997), Cordero *et al.*, (1999), Vargas y Cervantes (2000). Luego de varios años de planeación, se inició en el año 1994 la construcción del proyecto, el cual se ubica 7 km al este de la ciudad de Turrialba.

La metodología empleada en este trabajo ha sido la recopilación bibliográfica y la interpretación de los resultados obtenidos por el ICE, a partir de los diferentes trabajos de campo realizados durante la fase de factibilidad y de construcción de varias obras. Esto labor previa permitió definir las características geométricas e hidráulicas y la distribución de la superficie piezométrica de los acuíferos principales en el área de la presa. Esto es la base para diseñar el modelo conceptual y llevar a cabo estudios del funcionamiento del acuífero inferior, lo que permitiría, a su vez, pronosticar el comportamiento del mismo ante esfuerzos de bombeo y la influencia sobre los niveles piezométricos.

Luego de discretizar el acuífero por medio de una malla, se incorporan todos los datos hidrogeológicos y físicos obtenibles del sistema acuífero en el modelo, se introducen las condiciones de frontera y algunos parámetros se han ajustan durante la calibración. Para encontrar los caudales de bombeo adecuados para obtener el abatimiento requerido se utiliza la opción de celdas de carga constante y la opción *zone budget*. Finalmente, considerando de manera crítica los resultados, se debe discutir sobre las posibles fuentes de error y mejoramiento del modelo.

Un modelo matemático está basado en la ecuación de flujo. Para su solución son necesarias las condiciones iniciales y las condiciones de frontera. Las condiciones iniciales se componen de una distribución inicial del nivel piezométrico o freático en el punto de tiempo t_0 , en el cual la simulación se inicia. Como límites o barreras hidráulicas existen las de tipo 1 (Dirichlet), 2 (Neumann) y 3 (Cauchí), así como las de presión cero $p = 0$ y de borde móvil (Anderson y Woessner, 1992; Kinzelbach y Rausch, 1995).

Condiciones geológicas en el sector de la presa y de los canales de derivación

Para investigar las condiciones geológicas del sitio se cuenta con la información brindada por varias perforaciones, las cuales alcanzan individualmente en la mayoría de los casos poco menos de los 100 m. La superficie del terreno se ubica a una altura de entre 550 y 600 m.s.n.m. Entre el río Reventazón y el río Tuis las perforaciones alcanzan la cota en profundidad de 475 m.s.n.m. Sin embargo, esta cota es superada solo por algunas perforaciones. El área de estudio es una depresión, que en el sitio de construcción tiene un ancho de 1 km

y se extiende hacia el sur por varios kilómetros. Esta depresión alcanza la cota de aproximadamente 580 m s.n.m, mientras que el río Reventazón y el río Tuis han construido una terraza que alcanza una cota de entre 540 hasta 560 m.s.n.m. Los perfiles de perforación demuestran que el sector estudiado presenta diferencias en la distribución vertical y horizontal de los materiales en una distancia muy corta.

Acuíferos en el área de estudio

Los perfiles de perforación obtenidos del área de la presa y de los vertederos permiten diferenciar 4 horizontes aluvionales, los cuales se encuentran separados por medio de flujos laháricos (Fig.2). De igual manera que el horizonte aluvional más profundo se pueden reconocer los otros tres por medio de la elevación del límite inferior o superior. El límite inferior del horizonte intermedio se ubica en 520 m.s.n.m y en el caso del horizonte superior el límite inferior se encuentra a una elevación de 530 m.s.n.m. Siguiendo a estos niveles, se encuentra un horizonte aluvional superficial con un límite inferior de 550 m.s.n.m. De los cuatro horizontes en orden ascendente que aparecen en las perforaciones, aquí se ha detallado en el acuífero inferior (Qal3).

Acuífero inferior

A partir de la información extraída de las perforaciones, se deduce que el acuífero inferior presenta la mayor extensión. Se extiende en dirección E a partir de la presa, pasando por el río Tuis y se extiende parcialmente por el valle del río Reventazón, con un ancho aproximado de 200 m. Se supone además una extensión de este horizonte en dirección norte, la cual debe ser comprobada. En su conjunto se considera este horizonte aluvional como un sistema antiguo del río Reventazón

(Fig. 3). Sobre el acuífero existen datos provenientes de 10 perforaciones. Al sur del sitio de presa se encuentra la perforación PAN REC 12. Esta muestra que el acuífero presenta cierta extensión a lo largo del valle del río Reventazón. La extensión en el valle del río Tuis no está definida aún. El espesor de este acuífero alcanza entre 10 y 27,5 m (Cuadro 1). El límite superior alcanza la cota de 500 m.s.n.m en el área de la presa y, en el sector del embalse y el límite inferior, entre 475-480 m.s.n.m.

En el Cuadro 2 se muestran los niveles piezométricos medidos por el ICE en ocho piezómetros al comienzo de una prueba de bombeo, en octubre de 1994. Los valores piezométricos mencionados se ubican muy por encima del río Reventazón, el cual alcanza en el sitio de presa una cota de 548,0 m.s.n.m., estimándose por lo tanto diferencias de más de 15 m. Considerando los valores piezométricos existentes se estimó la superficie piezométrica sobre el área total del acuífero a base de puntos discretos y por medio del programa Surfer (Golden Software). En la Fig. 3 se presentan las líneas del nivel piezométrico interpoladas para la

Los perfiles de perforación obtenidos del área de la presa y de los vertederos permiten diferenciar 4 horizontes aluvionales, los cuales se encuentran separados por medio de flujos laháricos

Cuadro 1
Espesor del acuífero inferior (Qal3).

Perforación	Espesor (m)
PAN 32 SP	27,5
PAN 33 SP	22,5
PAN 37 A	26,5
PAN 37 B	27,0
PAN 37 SP	>23,5
PAN REC 12	>12,4
PAN 14 SP	>23,0
PMDC	10,0
Promedio	23,2

PMDC: Perforación margen derecha del cuenco.

Cuadro 2
Nivel piezométrico del acuífero inferior en octubre de 1994

Piezómetro	Lat.	Long.	Ubicación (m.s.n.m)	Nivel piezométrico
PAN 37	206170,19	575847,04	Vertedor principal	573,80
PAN 45	206089,34	575639,29	Vertedor principal	573,63
PAN 48	205923,53	576009,87	Vertedor emergencia	575,10
PAN 49	206100,46	576083,24	Túnel	574,00
PAN 55 TA	206013,33	575813,13	Toma de agua	574,80
PAN REC 12	205085,82	575267,44	Embalse	579,00
PAN REC 7	203941,03	574148,29	Embalse	581,50
PAN REC 8	204084,88	573448,23	Embalse	583,00
PAN REC9	204659,73	573971,03	Embalse	580,20
PAN REC 10	203548,25	574642,14	Embalse	584,00

extensión completa del acuífero. A partir de ellas se determina una dirección principal de flujo del agua subterránea N-NE, la cual coincide con la dirección de flujo del río Reventazón.

Los parámetros hidráulicos, transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero fueron calculados por medio de métodos matemáticos de tipo analítico. Los datos empleados provienen de una prueba de bombeo, la cual se ejecutó desde el 4 al 8 de octubre de 1994 (ICE,1994). Durante la prueba de bombeo, la cual tuvo una duración de 5195 minutos, la perforación PAN 37SP, que se encuentra en el área del canal de derivación principal, fue utilizada como pozo de bombeo, extrayéndose un caudal constante de 90 l/s (7776 m³/día). El ensayo tenía como objetivos medir el abatimiento y la influencia sobre los acuíferos intermedio y el coluvio, así como el cálculo de los parámetros hidráulicos del acuífero inferior. Para la evaluación del ensayo se midió el abatimiento en 13 piezómetros (Cuadro 3). El nivel de agua en el lahar fue medido por medio de 3 piezómetros, los cuales no mostraron abatimiento. Tampoco las perforaciones

PAN REC 10 y PAN 36 SP, las cuales captan el acuífero intermedio, mostraron abatimiento.

La transmisividad y el coeficiente de almacenamiento se estimaron por medio del método de Cooper y Jacob (Cooper y Jacob 1946, en Langguth y Voigt 1980; Kruseman y De Ridder 1994). Los valores de transmisividad son de alrededor de 500 m²/día y los coeficientes de almacenamiento alrededor de 10⁻⁴ (Cuadro 4).

Características del acuitardo

Sobre el acuífero inferior se encuentra un material de menor permeabilidad, cuyo espesor se encuentra entre 11,3 y 19,2 m (Cuadro 5). Se trata de limo, limos arcillosos y arcillas, en los cuales se encuentran dispersos fragmentos de lava de variado tamaño. Una parte del material coluvial se podría considerar al menos como lahar, el cual está compuesto por cantos y bloques envueltos en una matriz arcillosa, con lentes de arenas finas; el material deja la impresión de una alta densidad y baja permeabilidad.

Cuadro 3
Abatimiento medido en el acuífero inferior.

Piezómetro	Distancia al pozo (m) de 5195 Min. (m)	Abatimiento después
PAN REC 12	1233,1	3,7
PAN 45 SP	226,1	5,2
PAN 55 TA	163,7	5,9
PAN 48 LT	636,5	5,6
PAN 49 LT	611,6	6,0
PAN 37 A	3,6	7,6
PAN 37 B	19,8	6,9
PAN 37 C	38,6	6,7
PAN 32 SP	43,6	6,7
PAN 33 SP	21,3	7,3
PAN 37 CH	26,4	6,4

Cuadro 4
**Parámetros hidráulicos en el acuífero inferior determinados
según el método de COOPER & JACOB (1946).**

Sondeo de observación	T (m ² /día)	K (m/día)	S (sin unidades)
PAN REC 12	657		7 E-5
PAN 32 SP	553	20*	7 E-3
PAN 33 SP	536	24**	2 E-2
PAN 45 SP	542		8 E-4
PAN 48 SP	546		4 E-4
PAN 55 SP	605		6 E-4

*Espesor : 27,5 m ** Espesor : 22,5 m

Programa utilizado en la modelación

En el presente trabajo se ha utilizado el programa Modflow desarrollado por Mc Donald y Harbaugh (1988) y auspiciado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). El modelaje fue realizado con este programa, pues es conocido, probado en múltiples ocasiones, puede simular acuíferos de manera tridimensional y

permite la conexión con otros paquetes de cómputo.

Cálculo del abatimiento requerido

La excavación del embalse requiere la disminución de la presión del agua en el acuífero confinado inferior para evitar levantamientos y surgencia de agua por medio de grietas o fallas. Según los análisis geotécnicos se requiere abatir el nivel de agua en un valor de 17 m en el sitio del vertedero principal.

Cuadro 5
Espesor del acuitardo en las perforaciones

Perforación	Espesor (m)
PAN 22 SP	12,1
PAN 31 SP	11,3
PAN 45 SP	13,2
PAN 46 SP	11,5
PAN 55 TA	16,4
PZ-9	19,2
PAN 66 SP	12,0
PAN 14 SP	14,8
PAN 57 SP	17,6
PAN 36 SP	16,0
PAN 37 CH	15,0
Promedio	14,7

Construcción del modelo

El modelo consta de cuatro capas, tres de ellas dispuestas para simular el acuitardo cada una de 25 m de espesor, mientras que la última capa representa el acuífero confinado de 25 m de espesor. La elevación mínima corresponde a la cota de 475 m, mientras que la elevación máxima es de 575 m.

El acuífero fue discretizado por rectángulos construidos mediante una malla de 20 columnas y de 20 filas; sin embargo, antes de la discretización se importó el mapa base del acuífero, en formato DXF de Autocad, que permitió definir los límites de manera más detallada. Posteriormente se refinó en el sector de los vertederos, de tal manera que se obtuvieran celdas de 7,0 m x 7,5 m para obtener más precisión en el cálculo del abatimiento.

Condiciones de frontera

Se han definido bordes de no flujo en los límites Este y Oeste, mientras que un límite de tipo río en el sector Sur, con

una carga hidráulica que va de 583 a 582 con una conductancia de 1000 m²/d. Por su parte, se utilizó una barrera de carga constante en el sector Norte. Durante la simulación no se consideró necesario utilizar una recarga distribuida para el área, ya que gran parte de la recarga ocurre en la parte alta del valle del río Reventazón, donde se infiltra parte del caudal de este río. No se descarta que el río Tuis aporte una cierta cantidad de agua como parte de la recarga.

Asignación de parámetros

Se ha modelado un acuífero de tipo confinado con valores de conductividad hidráulica de 20 m/d y un coeficiente de almacenamiento de 0.00036 que se utilizaría en caso de simular condiciones de estado transitorio. La distribución de estos parámetros es homogénea en la capa del acuífero.

Calibración del modelo

Para esta etapa se utilizaron los valores del nivel potenciométrico de agua subterránea del acuífero inferior medidos en 6 piezómetros alrededor del vertedero. El modelo se ajustó modificando el valor de la conductividad hidráulica, hasta alcanzar una diferencia entre los valores simulados y los medidos menores a 1m. En los primeros intentos el ajuste fue mayor a 1m. En la Fig. 5 se muestran los valores calculados y los observados para un error medio absoluto de 0,9 m, lo cual en términos de un acuífero con una extensión de alrededor de 12 km² es significativamente bajo.

Cálculo de caudales de bombeo

Una vez corrido el modelo en estado estacionario y obtenida la superficie equipotencial, se ubicaron seis pozos alrededor del vertedero con la rejilla colocada en el acuífero confinado (475-500 m de elevación). Estos pozos se

colocaron en modo inactivo, con un caudal de 0 m³/d. Posteriormente, se utilizaron celdas de carga constante ubicadas en las celdas de los pozos, con un valor de 540 m y con un período de funcionamiento de 365 días. Este valor de carga constante se determinó luego de varias corridas del modelo, donde se logró obtener una elevación del nivel piezométrico a la cota 558 m alrededor del vertedor principal.

A partir de este momento, se incorporó la opción de *zone budget* para cada una de las celdas de los pozos. Con esta opción, es posible calcular las entradas o salidas de volúmenes de agua en las celdas en un tiempo determinado, lo cual se traduce más adelante en el caudal de bombeo en cada pozo. La etapa siguiente, consistió en correr el modelo en estado estacionario y comparar el cono de abatimiento simulado con el requerido. Los aspectos fundamentales para lograr la distribución adecuada de los abatimientos es la separación de los pozos y el valor de la carga constante asignada en las celdas específicas. Los caudales estimados varían de 5234 m³/d (60,6 l/s) hasta 4016 m³/d. El caudal menor se obtuvo para el pozo 6, lo cual se explica por la convergencia de los conos de abatimiento de los pozos 2,3 y 5. Por su parte, los caudales mayores se obtienen en los pozos 1 y 4 ubicados más cerca de la barrera de carga constante, lo que demanda un mayor caudal para lograr el abatimiento esperado. Una vez que se calculó el caudal requerido para lograr los abatimientos deseados, se procedió a activar los pozos y asignarles el caudal correspondiente estimado en la fase anterior. Fue necesario entonces eliminar las celdas de carga constante y correr el modelo en estado transiente, utilizando los niveles piezométricos obtenidos en la etapa inicial, donde se simuló el estado estacionario sin zonas de carga constante.

Finalmente se obtiene la configuración de la superficie piezométrica, como se muestra en la Fig. 6.

Conclusiones

Es probable que la recarga desde el río Reventazón en la parte alta del valle desempeñe un papel más importante con respecto a la recarga por infiltración de la lluvia, ya que el coluvio o material lahárico que cubre el acuífero inferior retiene el agua y permite una lenta precolación. El valor de conductividad hidráulica más adecuado en la zona alrededor del vertedero es de alrededor de 20 m/d. Por su parte el valor del coeficiente de almacenamiento más adecuado es de 1×10^{-4} . El adecuado conocimiento de la hidroestratigrafía en el sitio favorece la construcción del modelo, así como la ejecución e interpretación de pruebas de bombeo de larga duración.

La construcción del modelo por medio de una discretización fina en las zonas de mayor interés permite mayor precisión y mayor ahorro de memoria en la computadora, lo que permite obtener resultados más rápidamente durante la fase de calibración. La importancia de los modelos hidrogeológicos es que permiten desarrollar diferentes escenarios. Sin embargo, la capacidad de predecir resultados dependerá de la calidad de los datos introducidos al modelo.

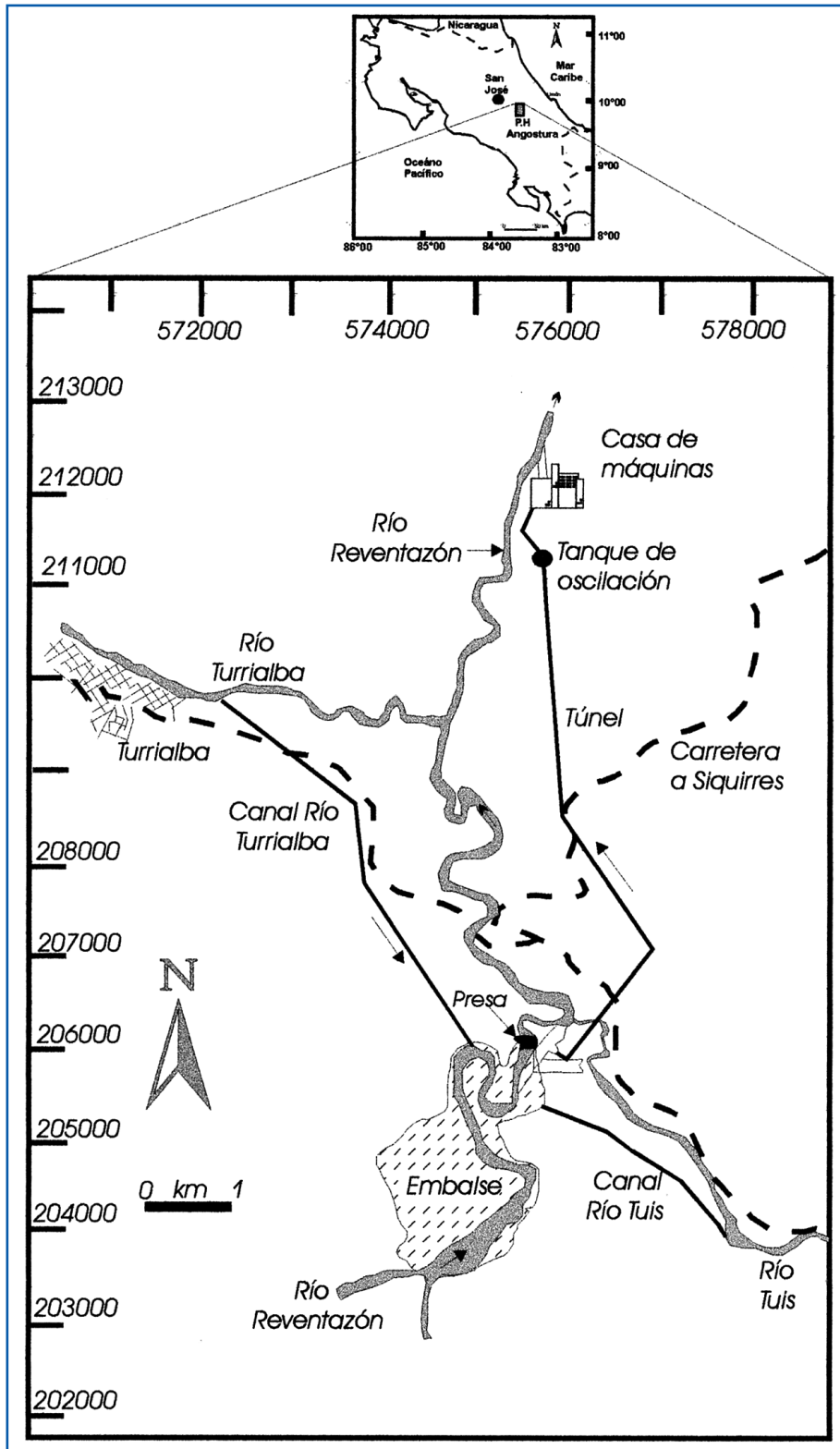


Figura 1
Ubicación de las principales obras del P.H. Angostura

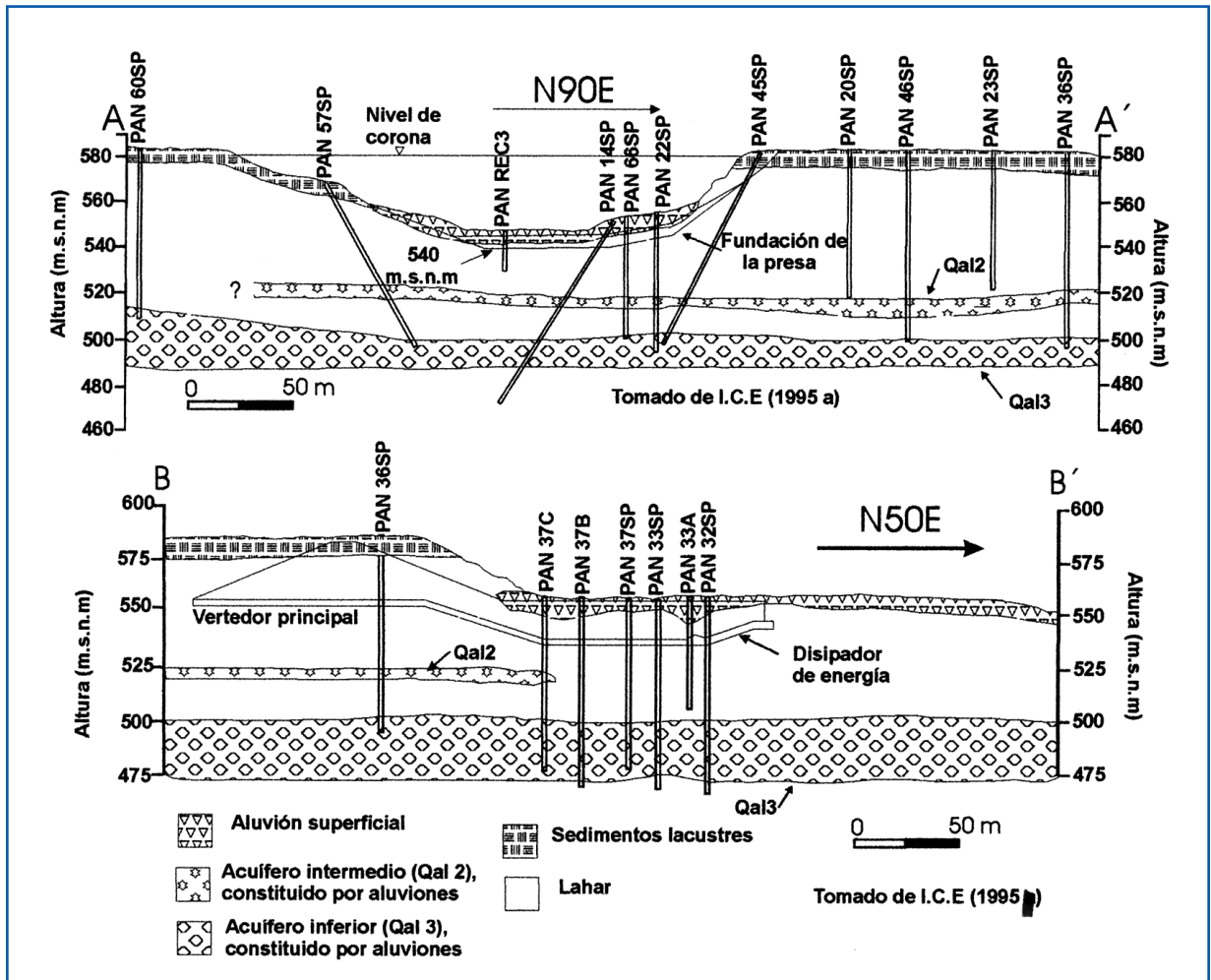


Figura 2
Perfiles hidrogeológicos en el sector de la presa del P.H. Angostura

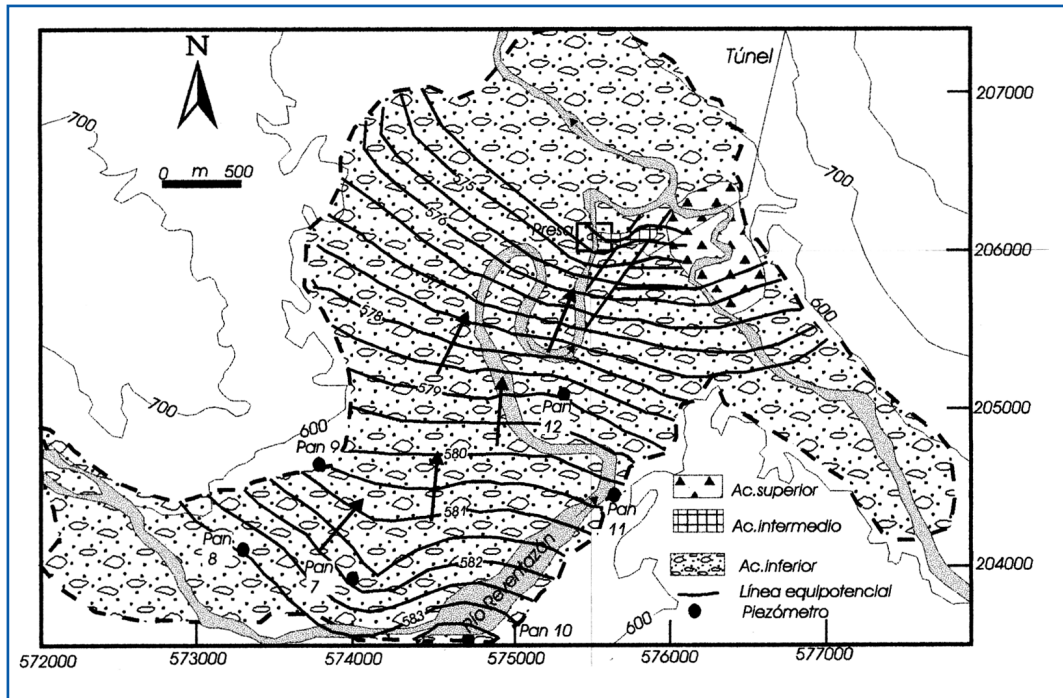


Figura 3
Equipotenciales del nivel de agua subterránea del acuífero inferior en el sector de la presa y el embalse.

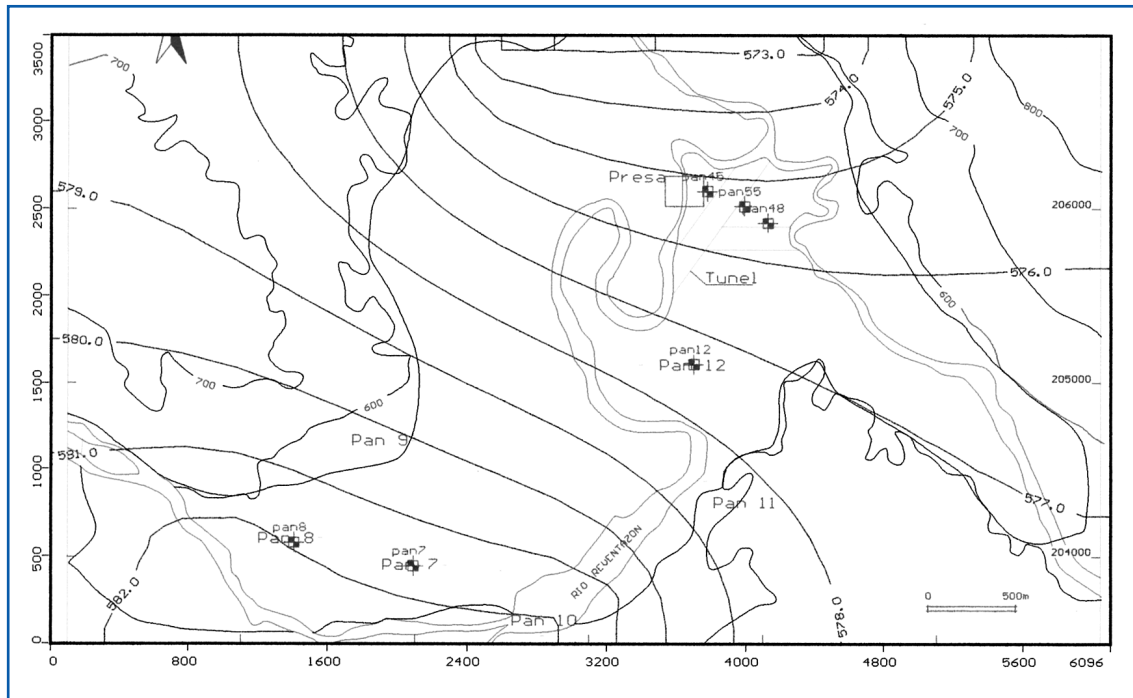


Figura 4
Simulación de la superficie piezométrica del acuífero inferior en estado estacionario.

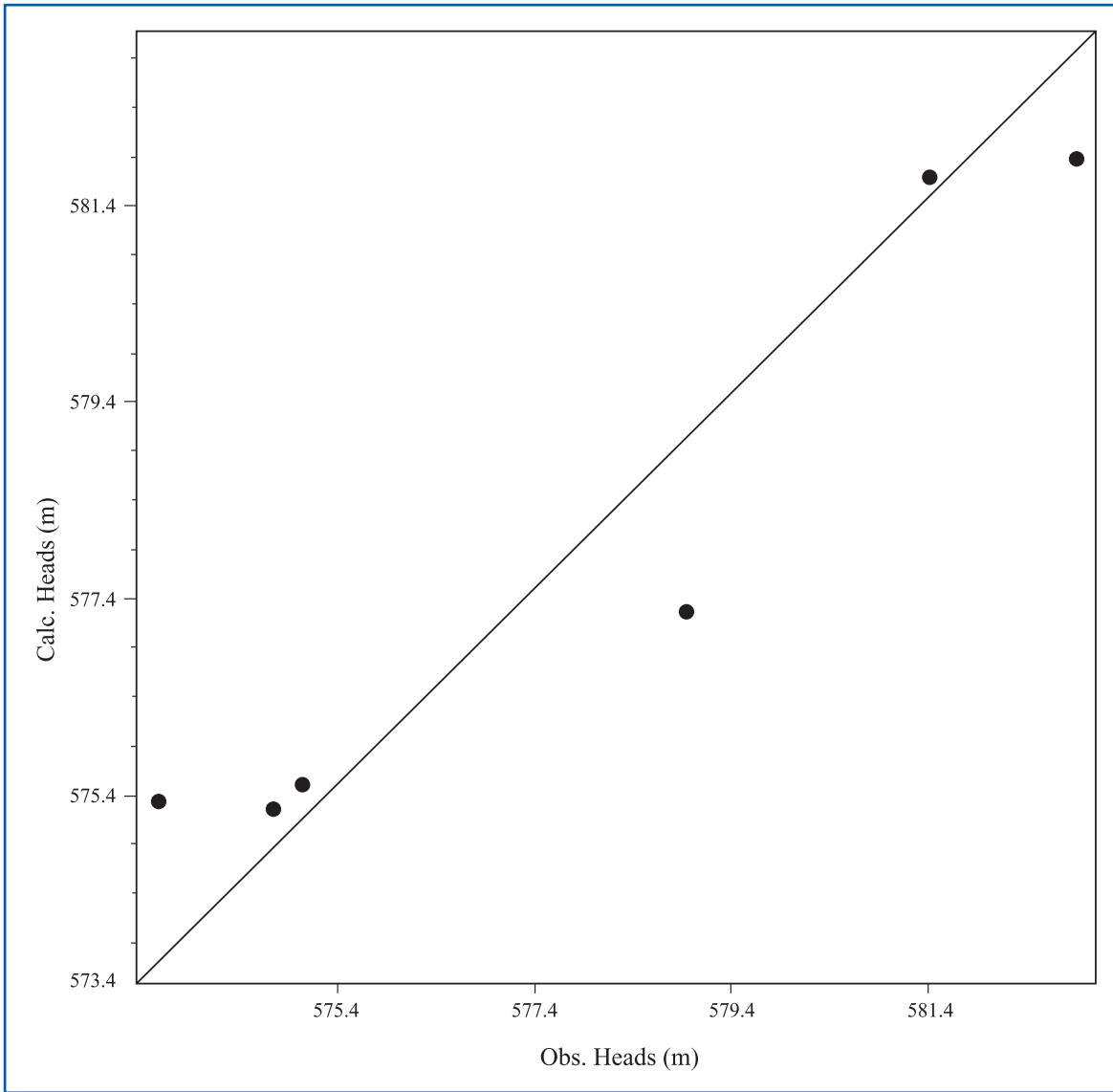


Figura 5
Valores calculados vs valores simulados en el estado estacionario.

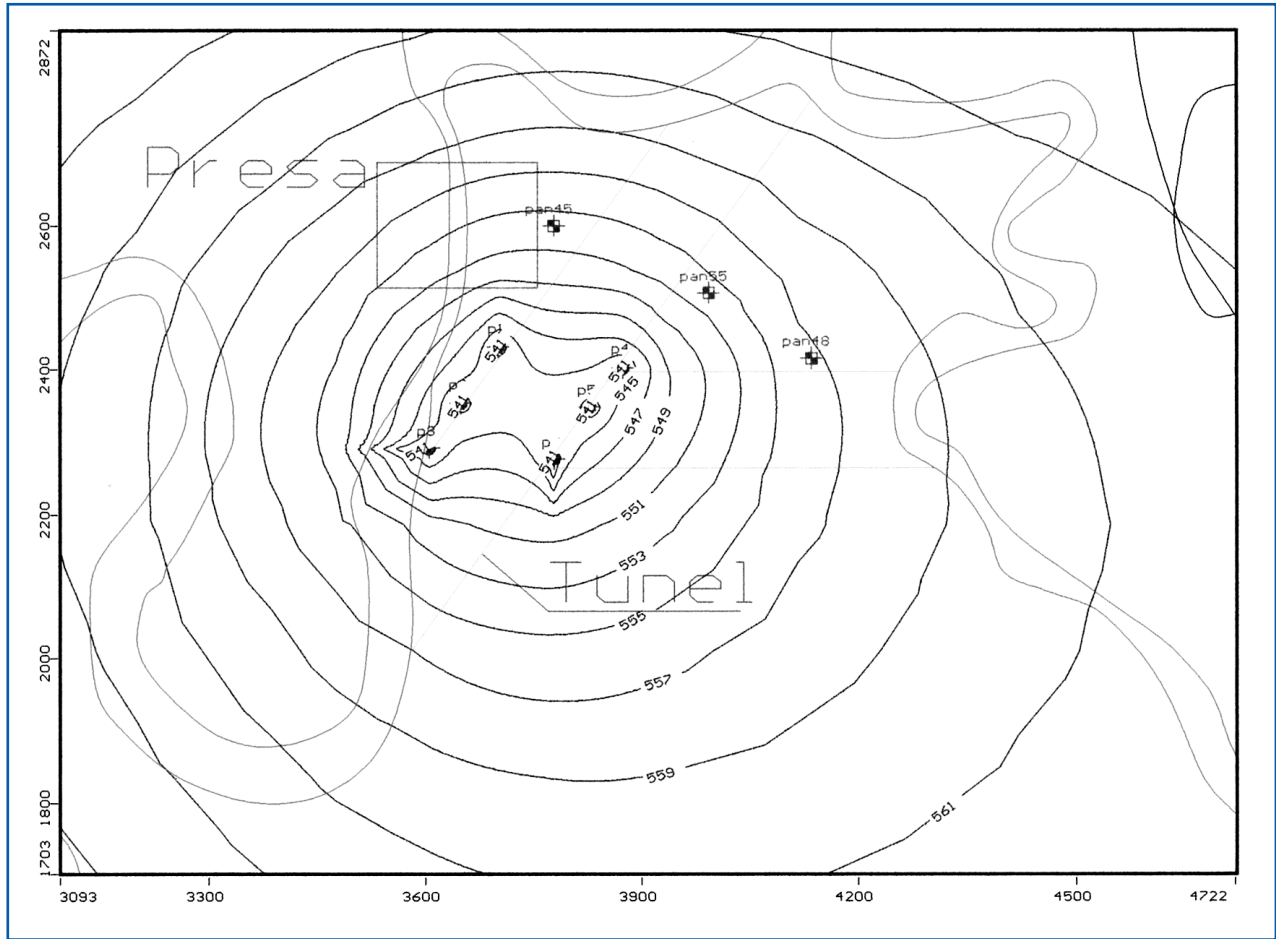


Figura 6
Simulación del abatimiento provocado por la batería de pozos en la zona del vertedero principal.
 Archivo: modelonumérico.doc (documento de word)

Bibliografía

- Anderson y Woessner, 1992. Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic Press. 372 pp. San Diego.
- Alvarado, G. y Leandro, C., 1997. Actualización geológica-geofísica de los sitios en donde se construirán las grandes obras del P.H Angostura. Un enfoque hacia problemas ingenieriles conexos. Sector energía. Instituto Costarricense de Electricidad. Departamento de ingeniería geológica. 88 pp. San José.
- Ávilés, E., 1994. Resultado de las Investigaciones Geológicas y Geotécnicas del Túnel de Conducción. Anexo B. Características geotécnicas de los materiales. Campaña 1994. Proyecto Hidroeléctrico Angostura. ICE. 40 pp. San José.
- Cordero, C.; Calvo R.; y Hirata, R., 1999. Estudio del acuífero de Angostura. Turrialba Proyecto ARCAL XXXI. 22 pp. San José.
- Cooper, H. y Jacob, C., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans. Am. Geoph. Union 27: pp. 526-534. Virginia.
- Granados, R. y Morera, J.F. 1980. Informe Geológico Preliminar a la fase de Viabilidad. Proyecto Hidroeléctrico Angostura. ICE. 60 pp. San José.
- ICE, 1977. Estudio geológico preliminar de parte del Proyecto Hidroeléctrico Angostura. DIE. ICE 52 pp. San José.
- ICE, 1994. Prueba de bombeo (04/10-08/10/1994). Oficina de perforación e inyección. Proyecto Hidroeléctrico Angostura. 31 pp. San José.
- ICE, 1995. Informe para el VI Panel de Consultores. DIC. P.H. Angostura. 53 pp. San José.
- ICE, 1996. Estado de avance del proyecto para el VII panel de consultores. DIC. Proyecto Hidroeléctrico Angostura. 140 pp. San José.
- Kinzelbach y Rausch, 1995. Grundwassermodellierung. Eine Einführung mit Übungen.- Gebrüder Borntraeger. 283 pp. Berlin.
- Kruseman, G.P., & de RIDDER, N.A. 1994. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. 2 Ed. ILRI. 377 pp. Wageningen, Holanda.
- Langguth, H. R y Voigt. R., 1980: Hydrogeologische Methoden. Springer Verlag. 486 pp. Berlin.
- Morera, J.F. 1983. Informe Geológico a la Fase de Viabilidad Proyecto Angostura. ICE. Proyecto Hidroeléctrico Hidroeléctrico Angostura. 159 pp. San José.
- Piedra, P. J. 1994: Resultado de las Investigaciones Geológicas y Geotécnicas del Túnel de Conducción. Anexo A. Campaña 1994- Gráficos Geológicos de Perforación. ICE Proyecto Hidroeléctrico Angostura. 30 pp. San José.
- Piedra, P. J., Ávilés, E., Leandro, C., 1994. Resultado de las Investigaciones Geológicas y Geotécnicas del Túnel de Conducción. Campaña 1994- Dic. ICE. Proyecto Hidroeléctrico Angostura. 64 pp. San José.
- Piedra, P. J., Chávez, C. J., Barrantes, P. L, Ayala, A. 1995. Resultado de la investigación geológica adicional en el primer tramo del túnel de conducción. V Panel de Consultores. ICE. Proyecto Hidroeléctrico Angostura. 20 pp. San José.
- Sáenz, L.F. 1985. Estudio geofísico para la factibilidad del proyecto hidroeléctrico Angostura. Tesis de Lic. Escuela de Geología. 74 pp. + mapas. San José.
- Vargas, A. 1997. Hydrogeologische um geohydraulische Untersuchungen im Tal des Río Reventazón, Costa Rica. Lenz Verlag. 189 pp. Gießen. Alemania.
- Vargas, A. y Cervantes, F. (2000): Caracterización de acuíferos en el área de la presa del Proyecto Hidroeléctrico Anagostura, Turrialba, Costa Rica. Rev. Geol. de América Central . No. 23. pp. 65-76. San José.